УДК 621.316.9:620.193.7

РАСЧЕТ КОРРОЗИОННЫХ ТОКОВ ДЛЯ МОДЕЛИ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Л.Д. Сафрошкина, Ю.Р. Гунгер, В.Е. Дмитриев, Ю.В. Демин

Новосибирская государственная академия водного транспорта. г. Новосибирск
E-mail: ngavt@ngs.ru

Рассматриваются расчетные модели коррозионных токов и потенциалов (напряжений), возникающих при грунтовой (электрохимической) коррозии подземного сооружения, состоящего из металлически связанных между собой горизонтальных и вертикальных линейных элементов с учетом сопротивлений поляризации элементов, их сопротивления растеканию и взаимных сопротивлений.

В процессе эксплуатации в агрессивных условиях заземляющие системы (ЗС) электроустановок подвергаются воздействию электрохимической коррозии и разрушаются [1]. Для разработки методов защиты от коррозии ЗС и оптимизации применения защит необходимо знать распределение коррозионных токов в указанных системах. С этой целью предлагается метод расчета коррозионных токов в ЗС, физической основой которого является теория многоэлектродных электрохимических систем. В основе математической модели лежит система нелинейных уравнений, связывающих значения электродных электрохимических потенциалов и коррозионных токов.

Для этого типа коррозии рассматривается эквипотенциальный вариант решаемой задачи. При этом пренебрегают продольным сопротивлением элементов для протекающих по ним токам по сравнению с их (элементов) поперечным сопротивлением для стекающих в грунт токов. В этом случае все элементы рассматриваемой системы соединены "звездой" и имеют единый компромиссный потенциал.

В рассматриваемом решении поляризационные характеристики элементов задаются в виде электродных потенциалов (напряжений) $U_э$ и сопротивлений поляризации $R_э^А$ (анодное) и $R_э^К$ (катодное). При более строгом решении учитывается зависимость сопротивления поляризации каждого элемента от величины коррозионного тока. Последнее достигается заданием по каждому элементу исходной информации о значениях анодного и катодного напряжений, отвечающих фиксированным величинам коррозионных токов.

Решение рассматриваемой задачи осложняется отсутствием исходной информации о характере поляризации (анодная или катодная), соединенных в систему элементов. Существующие в настоящее время решения по определению типа поляризации элементов не учитывают их взаимных гальванических связей [2]. Использование же итерационных решений без задания исходной информации о характере поляризации элементов зачастую ведет к расхождению итераций. В предлагаемом нами решении исходный тип поляризации для каждого элемента определяется путем предварительного анализа решаемой системы уравнений с учетом гальванических связей всех элементов. И только в случае несовпадения знаков коррозионного тока, полученных по предварительному анализу и при окончательном решении для отдельных элементов, для них производится смена типа поляризации с последующим запуском итерационного процесса. При этом, как правило, случаи использования итераций очень ограничены и обычно связаны с некорректной постановкой задачи.

В случае необходимости уточнения полученного решения с учетом нелинейной зависимости сопротивления поляризации элементов от величины коррозионных токов, это выполняется с помощью итерационных циклов, использующих вышеупомянутые зависимости напряжений поляризации (анодных и катодных) от величины коррозионных токов. Но при этом, как правило, уточняются только величина сопротивления поляризации, а их тип не меняется.

Таблица 1. *Поляризационные характеристики для контрольной расчетной модели*

Номера элементов модели	Сопротивление поляризации, Ом		Электродный потенциал $U_э$, В
	Анодное $R_э^А$	Катодное $R_э^К$	
1	82,22	36,30	–0,12
2	183,48	27,12	–0,10
3	400,27	36,91	–0,24
4	221,87	21,87	–0,28
5	57,14	60,00	–0,35
6	51,51	40,40	–0,21
7	18,69	20,56	–0,33
8	33,73	19,68	–0,28
9	61,92	16,54	–0,30
10	6,30	6,30	–0,53
11	40,00	53,53	–0,51
12	40,40	37,37	–0,47
13	14,04	137,37	–0,37

Рассматриваемая расчетная модель предполагает однородное строение грунта. В основу этого положены следующие факторы:

– существенное (как правило, в несколько раз) преобладание собственных значений поперечных сопротивлений над взаимными;
– в отличие от обычного заземлителя (потенциалы на котором задаются относительно бесконечности коррозионные напряжения относятся только к ближней области [1, 2], поскольку свя-

заны с возникновением на поверхности металла двойного электрического слоя;

– коррозионные токи замыкаются между элементами внутри сооружения, а не вытекают (втекают) из него, как в случае заземлителя.

На основании вышеизложенного, при расчетах собственных значений поперечных сопротивлений для каждого элемента предусмотрена возможность использования своего удельного сопротивления грунта. При расчетах же взаимных поперечных сопротивлений задается общее для всего сооружения удельное сопротивление грунта. Значения сопротивления поляризации приведены в табл. 1.

Исходные системы уравнений и способы их решения для эквипотенциального варианта грунтовой коррозии

Исходная система уравнений для рассматриваемого вида коррозии может быть записана в виде следующих матриц:

$$\begin{vmatrix} R_{11},\ldots, & R_{1p},\ldots, & R_{1n},\ldots, & 1 \\ & \ldots\ldots & & \\ R_{p1},\ldots, & R_{pp},\ldots, & R_{pn},\ldots, & 1 \\ & \ldots\ldots & & \\ R_{n1},\ldots, & R_{np},\ldots, & R_{nn},\ldots, & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \bar{I}_1 \\ \ldots \\ \bar{I}_p \\ \ldots \\ \bar{I}_n \\ U_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_1 \\ \ldots \\ U_p \\ \ldots \\ U_n \\ 0 \end{vmatrix}, \qquad (1)$$

где R_{ij} – собственные и взаимные значения поперечных сопротивлений между i-ым и j-ым элементами; $\bar{I}_j$ – поперечный ток, отекающий (втекающей) с j-го элемента; U_0 – компромиссный потенциал системы рассматриваемых элементов, соединенных "звездой"; U_i – исходные (задаваемые) электродные потенциалы одиночных элементов (до их соединения в систему).

В состав собственного ($i=j$) значения поперечного сопротивления $R_{ii}=R_{ii}^{г}+R_{ii}^{и}+R_{ii}^{A,K}$ входят: $R_{ii}^{г}$ – сопротивление растеканию металл-грунт; $R_{ii}^{и}$ – поперечное сопротивление изоляционного покрытия элемента (при его наличии); $R_{ii}^{A,K}$ – сопротивление поляризации (анодное или катодное) рассматриваемого элемента.

Последнее уравнение системы (1) фиксирует равенство нулю суммы стекающих с элементов (катодных) и втекающих в них (анодных) токов. Последняя отрока квадратной матрицы, также представленный единицами (в конце – нуль), отвечает компромиссному потенциалу U_0, который как и поперечные токи $\bar{I}_j$ требует определения.

Основная трудность решения рассматриваемой системы (1) заключается в определении типа (анодное или катодное) сопротивления поляризации соединенных в систему элементов. Действительно, знак поперечного тока $\bar{I}_j$ (плюс – катодный, минус – анодный) определяет и величину сопротивления поляризации, поскольку значения R_{ii}^{A} и R_{ii}^{K} могут существенно отличаться друг от друга. К тому же, величина $R_{ii}^{A,K}$ является, как правило, преобладающей по отношению к сопротивлению $R_{ii}^{г}$, что является решающим при отсутствии изоляционного покрытия элементов ($R_{ii}^{и}$).

Для ориентировочного определения характера поляризации рассматриваемых элементов проведем предварительный анализ системы (1), записав их в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} R_{11},\ldots, & R_{1p},\ldots, & R_{1n} \\ & \ldots & \\ R_{p1},\ldots, & R_{pp},\ldots, & R_{pn} \\ & \ldots & \\ R_{n1},\ldots, & R_{np},\ldots, & R_{nn} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \bar{I}_1 \\ \ldots \\ \bar{I}_p \\ \ldots \\ \bar{I}_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_1 - U_0 \\ \ldots \\ U_p - U_0 \\ \ldots \\ U_n - U_0 \end{vmatrix}, \qquad (2)$$

Форма записи системы (2) предполагает, что значение компромиссного потенциала U_0 известно. При этом, поскольку собственные значения R_{ii} поперечных сопротивлений существенно (как правило, в несколько раз) превосходят их взаимные значения R_{ij}, знак поперечного тока $\bar{I}_j$ будет определяться знаком правой части (U_i–U_0) ур. (2). Общая сумма токов $\bar{I}_j$ в ур. (2) должна равняться нулю, согласно последнему уравнению системы (1).

Если исключить из системы (2) p-ое уравнение путем его вычитания из остальных уравнений, а затем убрать из квадратной матрицы столбец коэффициентов для тока $\bar{I}_p$, то получим дополнительную (остаточную) систему уравнений без p-го элемента и без компромиссного потенциала U_0;

$$\begin{vmatrix} (R_{11}-R_{p1}),\ldots, & (R_{1(p+1)}-R_{p(p-1)}),(R_{1(p+1)}-R_{p(p+1)}),\ldots, & (R_{1n}-R_{pn}) \\ (R_{(p-1)1}-R_{p1}),\ldots, & (R_{(p-1)(p-1)}-R_{p(p-1)}),(R_{(p-1)(p+1)}-R_{p(p+1)}),\ldots, & (R_{(p-1)n}-R_{pn}) \\ (R_{(p+1)1}-R_{p1}),\ldots, & (R_{(p+1)(p-1)}-R_{p(p-1)}),(R_{(p+1)(p-1)}-R_{p(p+1)}),\ldots, & (R_{(p+1)n}-R_{pn}) \\ (R_{n1}-R_{p1}),\ldots, & (R_{n(p-1)}-R_{p(p-1)}),(R_{n(p+1)}-R_{p(p+1)}),\ldots, & (R_{nn}-R_{pn}) \end{vmatrix} \times$$

$$\times \begin{vmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_{(p-1)} \\ \bar{I}_{(p+1)} \\ \bar{I}_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_1 - U_p \\ U_{(p-1)} - U_p \\ U_{(p+1)} - U_p \\ U_n - U_p \end{vmatrix}. \qquad (3)$$

Тип сопротивления поляризации $R_{ii}^{A,K}$ в диагональных коэффициентах (R_{ii}–R_{pi}) системы (3) будем задавать в соответствии со знаком правой части уравнений, т.е. при (U_i–U_p>0) – используется катодное сопротивление R_{ii}^{K}, при (U_i–U_p<0) берется анодное сопротивление R_{ii}^{A}, а при (U_i–U_p=0) – рекомендуется использовать среднее значение сопротивлений поляризации $(R_{ii}^{A}+R_{ii}^{K})/2$.

Вспомогательная система (3) используется для ориентировочного определения суммарного значения ($\sum_{j\neq p}\bar{I}_j$) коррозионных токов без учета p-ого элемента. Для этого достаточно обратить квадратную матрицу (3) и провести суммирование обращенных коэффициентов по столбцам. Умножив "постолбцовые" суммы на соответствующие значения правых частей системы уравнений (3) и сложив полученные результаты, найдем искомую сумму токов. Очевидно, что при $\sum_{j\neq p}\bar{I}_j>0$ – поляризация рассматриваемого p-ого элемента анодная (т.к. для баланса коррозионных токов не хватает отрицательного значения $\bar{I}_j$), а при $\sum_{j\neq p}\bar{I}_j<0$ – поляризация p-ого элемента катодная.

Вышеописанному анализу (с целью предварительного определения типа поляризации) подверга-

ются все элементы рассматриваемого сооружения. Исключение делается только для элементов с минимальным и максимальным значениями (с учетом знака) электродного потенциала, поскольку первый из них всегда будет анодом, а второй – катодом.

Определив ориентировочный характер поляризации всех элементов сооружения и, задействовав в соответствии с этим требуемые сопротивления поляризации $R_{ii}^{A,K}$, решим исходную систему ур. (1) относительно коррозионных токов и компромиссного потенциала. Сопоставляя знаки полученных коррозионных токов с результатами предварительного определения типа поляризации, убедимся в их совпадении. В случае несовпадения знаков по отдельным элементам их тип поляризации меняется в соответствии с результатом последнего расчета, и этот расчет повторяется до полного совпадения знаков коррозионных токов по данным последнего и предыдущего расчетов, т.е. запускается итерационный процесс.

Аналогичные итерационные циклы используются и при уточнении (в случае необходимости) полученных коррозионных токов за счет учета нелинейной зависимости сопротивления поляризации ($R_{ii}^{A,K}$) от величины коррозионного тока ($\overline{I}_j$). Но при этом, как правило, уточняется только величина сопротивления поляризации, а ее тип не меняется.

В табл. 2 приведены результаты контрольных расчетов коррозионных токов.

Расчетное значение компромиссного потенциала составило U_0=–0,335 В. Отметим также, что знаки коррозионных токов по предварительному определению и при окончательных расчетах совпали и дополнительных итераций не потребовалось.

Таблица 2. *Значения коррозионных токов для случая грунтовой коррозии*

Номер элементов	$I_{кр}$, мА	Режим работы элементов
1	5,10	катод
2	7,02	катод
3	2,30	катод
4	2,45	катод
5	+0,01	катод
6	3,06	катод
7	0,15	катод
8	2,10	катод
9	1,46	катод
10	–16,23	анод
11	–3,96	анод
12	–2,84	анод
13	–0,61	анод

Как видим из приведенных результатов расчетов, компромиссный потенциал системы U_0 оказывается достаточно близким к электродным потенциалам элементов №№ 5 и 7 (табл. 1), чем и объясняется малая величина их коррозионных токов. Вместе с тем, поскольку $U_5 < U_0$ и $U_7 > U_0$, коррозионный ток $\overline{I}_5$ оказывается анодным, а $\overline{I}_7$ – катодным. При этом, хотя модули разности потенциалов $|U_5–U_0|=|U_7–U_0|$ равны, коррозионный ток $|\overline{I}_7|$ практически в 10 раз превосходит по величине ток $|\overline{I}_5|$, что определяется существенно большим (почти в 3 раза) значением сопротивления поляризации R_5^A по отношению к сопротивлению R_7^A (табл. 1).

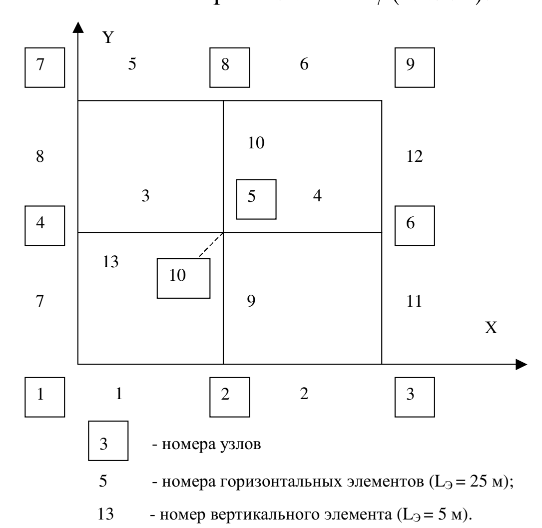


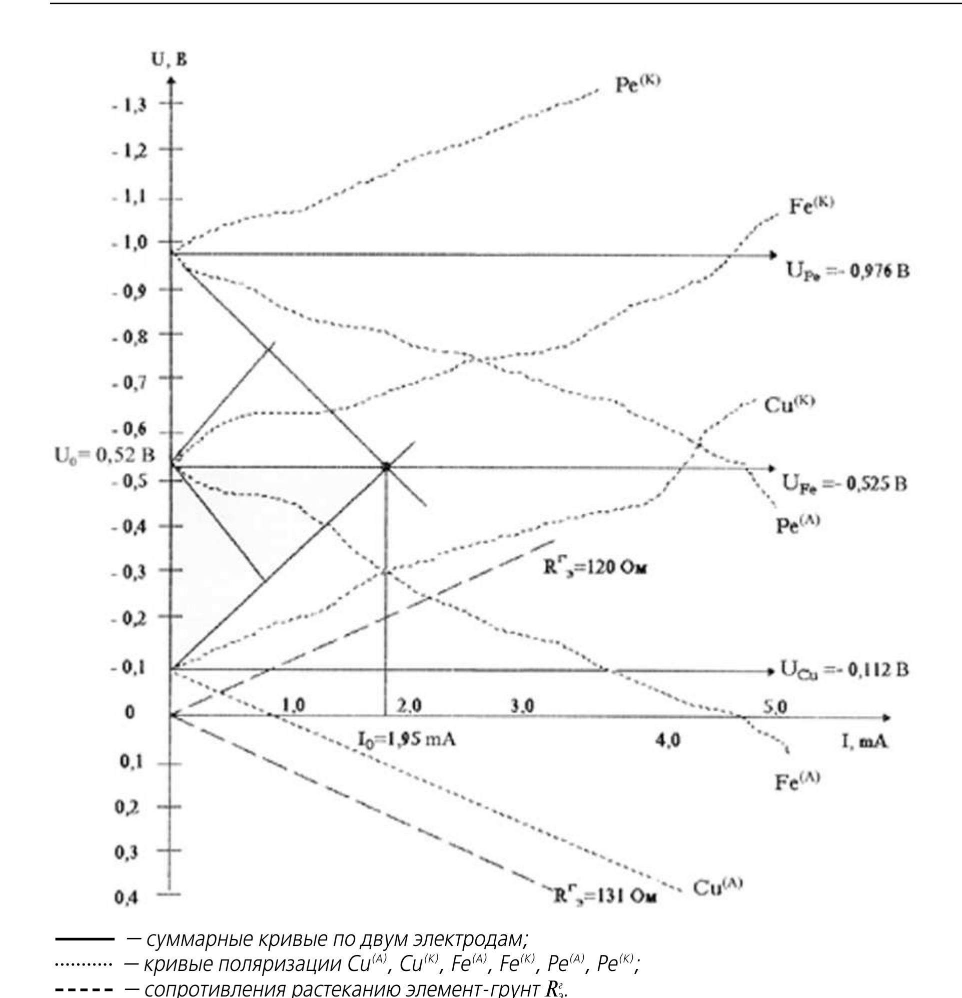
Рис. 1. *Расчетная модель заземлителя*

Аналогичная корреляция между знаком и величиной коррозионного тока, с одной стороны, и разностью потенциалов ($U_i–U_0$), а также сопротивлением поляризации $R_{ii}^{A,K}$, с другой, прослеживается и по остальным элементам рассматриваемого сооружения. Эта корреляция еще более усиливается при учете сопротивления растеканию металл-грунт $R_{ii}^{г}$, которое для горизонтальных элементов составило 6,11 Ом, а для вертикального – 17,6 Ом (сопротивление изоляции $R_{ii}^{и}$=0). Взаимные сопротивления растеканию R_{ij} имеют существенно меньшую величину и даже для соприкасающихся элементов составили для:

– параллельных горизонтальных 0,87 Ом,
– ортогональных горизонтальных 1,10 Ом,
– горизонтального и вертикального 1,93 Ом.

Для более удаленных элементов величина взаимного сопротивления R_{ij} составляет десятые доли Ом. Таким образом, влияние сопротивления растеканию на величину коррозионных токов проявляется наиболее сильно на элементах № 10 (горизонтальный) и № 13 (вертикальный), где они оказываются сопоставимыми с действующими сопротивлениями поляризации (R_{10}^{A}=6,30 и R_{13}^{A}=14,0 Ом).

Малая величина поперечного сопротивления $R_{10}=R_{10}^{A}+R_{10}^{г}$=6,30+6,11=12,41 Ом и большая разность электродного и компромиссного потенциалов $U_{10}–U_0$=–0,525+0,335=–0,190 В определила максимальную величину коррозионного анодного тока (–16,2 мА) у элемента № 10. С другой стороны, несмотря на сравнительно большую разность потенциалов $U_2–U_0$=–0,104+0,335=0,231 В у элемента № 2, относительно повышенная величина его поперечного сопротивления $R_2=R_2^{K}+R_2^{г}$=27,12+6,11=33,23 Ом привела к снижению стекающего с него коррозионного тока до $\overline{I}_2$=7,0238 мА (максимальный катодный ток).



—— *— суммарные кривые по двум электродам;*
········ *— кривые поляризации $Cu^{(A)}$, $Cu^{(K)}$, $Fe^{(A)}$, $Fe^{(K)}$, $Pe^{(A)}$, $Pe^{(K)}$;*
- - - - - *— сопротивления растеканию элемент-грунт $R_э^г$.*

Рис. 2. *Поляризационные кривые экспериментальных измерений для трех электродов — Pe (сплав), Fe, Cu (диаграмма Эванса)*

Определение значений сопротивления поляризации. Будем определять сопротивление поляризации ($R_э^{A,K}$) как отношение подаваемого на поляризуемый элемент напряжения $U_э^{A,K}$ (за вычетом величины электродного потенциала $U_{эо}^{A,K}$) и создаваемому этим напряжением коррозионному току ($\overline{I}_э^{A,K}$):

$$R_э^{A,K} = (U_э^{A,K} - U_{эо}^{A,K}) / \overline{I}_э^{A,K}. \qquad (4)$$

С этой целью измерим с помощью электрода сравнения электродный потенциал рассматриваемого одиночного элемента (при этом $\overline{I}_э^{A,K}$=0), а затем будем увеличивать или уменьшать (алгебраически) этот потенциал путем подачи на элемент дополнительных напряжений от внешнего источника. При этом будем одновременно измерять и значение искусственно создаваемого потенциала (с помощью электрода сравнения) и величину возникающего в результате поляризации элемента коррозионного тока. Определение тока выполняется с помощью подключения между элементом и землей измерительной цепи, содержащей стандартизированное сопротивление и милливольтметр.

Проводя вышеописанные измерения при алгебраическом уменьшении ($U_э^K$) искусственно создаваемых на элементе потенциалов (по отношению к электродному) или их увеличении ($U_э^A$), получим соответственно анодные или катодные поляризационные кривые, определяющие значения анодного ($R_э^A$) или катодного ($R_э^K$) сопротивления поляризации для фиксированной величины анодного ($\overline{I}_э^A$=const) или катодного ($\overline{I}_э^K$=const) коррозионного тока (рис. 2).

Сопротивление поляризации нелинейно зависит от величины коррозионного тока. При этом, как правило, характер анодных и катодных поляризационных кривых (а, следовательно, и величины отвечающих им сопротивлений поляризации) оказывается существенно различным. Более того, электродные потенциалы (начальные значения поляризационных кривых при $\overline{I}_э^{A,K}$=0) при анодной и катодной поляризации элемента могут иметь разные значения. Происходящие при этом изменения в правой части исходной системы уравнений (1) могут приводить к существенному изменению уровня компромиссного потенциала, а, следовательно, и характера поляризации ряда элементов, что резко усложняет ход итерационного процесса.

В этом плане предлагаемое определение сопротивления поляризации способствует более устойчивому ходу итерационного процесса, поскольку уточняется только один параметр – сопротивление поляризации, а значения электродных потенциалов остаются неизменными.

Из расчетов следует, что для снижения коррозии и повышения долговечности заземляющей системы необходимо повышать сопротивление растеканию горизонтальных шин, так как они объединяют всю систему в единое целое, а по условиям их работы в качестве искусственных заземлителей его наоборот надо понижать. Это противоречие можно разрешить поместив горизонтальные шины в засыпку, имеющую нелинейную электропроводность. Это в нормальном режиме работы означает повышение сопротивления растеканию, а в переходном резкое его уменьшение.

На основании расчетов коррозионных токов для модели заземляющей системы можно сделать следующие выводы:

1. На коррозию искусственных заземлителей максимальное влияние оказывают сопротивления поляризации и сопротивления растеканию. Взаимные сопротивления оказывают на коррозионные токи минимальное влияние и ими можно пренебречь.
2. Для обеспечения растекания токов коротких замыканий (снижения сопротивления растеканию) и снижения токов коррозии (повышения сопротивления растеканию) необходимо помещать горизонтальные шины в засыпку, имеющую нелинейную электрическую проводимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин Ю.В., Демина Р.Ю., Горелов П.В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах. Книга 1. Теоретические основы / Под ред. д.т.н., проф. В.П. Горелова. – Новосибирск: НГАВТ, 1998. – 209 с.
2. Иоссель Ю.Я., Кленов Г.Э. Математические методы расчета электрохимической коррозии и защиты металлов. Справочник. – М.: Металлургия, 1984. – 271 с.

УДК 621.374